Advanced Environmental Sciences ***(Adv. Environ. Sci.)*** **2025, 23(3):789-808** **ISSN: 2588-6177**

Original Article

Evaluation of Spatial Planning trough the Approach of Monitoring the Supply and Demand of Ecosystem Services in Different Scenarios

Received: 2024.11.02
Accepted: 2024.03.04

Hosein Karami, Romina Sayahnia,* Shahindokht Barghjelveh

Department of Planning and Designing the Environment, Environmental Science Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: In recent years, lifestyle changes and urbanization of societies on the one hand and macro environmental changes such as climate change on the other hand have caused changes in the spatial structure and transfer of resources between different economic sectors and different regions as well. Due to the long-term and comprehensive nature of spatial development plans, they should be able to adapt to macro environmental changes and have the necessary flexibility. Spatial balance in the concept of adapting the supply and demand of the environment, as the ultimate goal and achievement of land development, is important that will be affected by these macro changes in the long term. The degree of compliance of an experimental program with these changes is an indicator of its compatibility with the changes, and it is necessary to measure this compatibility by using models and simulation methods of the effects of these changes on the environment.

Materials and methods: Machine Learning models including Cellular Automata, Random Forest and Regression Models in the form of PLUS model were used to simulate the land use map in 2000, 2010 and 2020 and finally predict the land use changes based on climate change scenarios (ICCP) for the future 25-year horizon for two planning areas of Kerman province, including Kerman-Bardsir and Baft-Rabar-Borzowieh planning areas. The 2010-2020 model with a kappa coefficient of 0.94 and overall accuracy of 0.98 was used as the selected model for this simulation. The overlap of changes in land use classes in four scenarios was done with the development plan of the agricultural sector in the study regions, and the share of driving forces of land use changes was also calculated. Finally, the ecosystem services supply and demand adaptation to climate change was modeled in the region.

Results and discussion: The evaluation results showed that the lands under human construction had the highest percentage of changes during the studied period. Due to the aridity of the region, there has not been an increase in cultivated land in line with the increase in population in this region. Also, the development potential map of each of the land cover classes in the study area shows significant changes in agricultural lands and man-made lands. Regarding the driving forces, depending on the type of land use, each of the driving factors showed a different contribution to the amount of changes. Altitude, rainfall, and temperature factors were the most important factors and forces affecting land use changes in the study area with coefficients of 0.45, 0.35, and 0.15, respectively. The modeling of land use changes in line with climate change scenarios showed that the designed plan did not comply with any of the possible scenarios, and in this respect, the designed plan has a spatial imbalance and as a result, future Spatial planning is not compatible with possible climate changes in this region. This resulted in the comparison of supply through production in agricultural lands and demand through the increase of human population in the region.

Conclusion: The integration of economic, social and environmental factors is necessary for predicting land uses in order to implement sustainable development, and machine learning models for simulating land cover changes and estimating environmental supply make it possible for predicting the land preparation program evaluated and created the necessary flexibility for different scenarios, especially in super dry and hot lands, and led to the goals of sustainable development in these areas through adaptation.

Key words: Spatial Planning Adaptation, Arid lands, Land cover, Spatial balance.

How to cite this article:
Karami, H., Sayahnia, R. and Barghjelveh, S., 2025. Evaluation of Spatial Planning through the Approach of Monitoring the Supply and Demand of Ecosystem Services in Different Scenarios. Adv. Environ. Sci. 23(3): 789-808.

* **Corresponding Author Email Address:** r_sayahnia@sbu.ac.ir
DOI: 10.48308/envs.2025.237337.1454

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

علوم محیطی نوین، ۸۰۸-۷۸۹ : (۳) ۲۳، ۱۴۰۴ شاپا: ۶۱۷۷-۲۵۸۸

مقاله پژوهشی

ارزیابی برنامه آمایش سرزمین با رویکرد نظارت بر عرضه و تقاضای خدمات اکوسیستمی در سناریوهای مختلف تغییرات اقلیمی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۴

حسین کرمی، رومینا سیاح‌نیا*، شهیندخت برق جلوه

گروه برنامه‌ریزی و طراحی محیط، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده مبسوط

سابقه و هدف: در سال‌های اخیر تغییرات سبک زندگی و توسعه شهرنشینی جوامع از یک‌سو و تغییرات کلان محیطی، از جمله تغییرات اقلیمی، از سوی دیگر باعث تغییر در ساختار فضایی سرزمین و انتقال منابع بین بخش‌های مختلف اقتصادی در مناطق مختلف سرزمینی شده است. برنامه‌های بلندمدت توسعه فضایی سرزمین (آمایشی) به دلیل ماهیت زمانی و جامع‌نگری آن‌ها، لازم است بتوانند با تغییرات محیط سازگار بوده و از انعطاف‌پذیری لازم در مقابل تنش‌ها و تغییرات کلان محیطی برخوردار باشند. تعادل فضایی به مفهوم انطباق عرضه و تقاضای خدمات اکوسیستمی، به‌عنوان هدف و دستاورد نهایی برنامه آمایش سرزمین ازجمله مواردی است که در بلندمدت تحت تأثیر این تغییرات کلان قرار می‌گیرد. میزان انطباق یک برنامه آمایشی با تغییرات محیطی، نشانگر سازگاری آن با روند تغییرات بوده و لازمه سنجش این سازگاری، استفاده از مدل‌ها و روش‌های شبیه‌سازی اثرات تغییرات محیطی، ازجمله تغییرات اقلیمی، بر برنامه توسعه فضایی سرزمین است.

مواد و روش‌ها: مدل‌های یادگیری ماشین، شامل اتومای سلولی، جنگل تصادفی و مدل‌های رگرسیونی، در قالب مدل PLUS برای شبیه‌سازی نقشه‌ی پوشش اراضی در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ و پیش‌بینی پوشش اراضی در سناریوهای مختلف تغییرات اقلیمی در یک افق ۲۵ ساله برای مناطق گرم و خشک استان کرمان شامل مناطق برنامه‌ریزی کرمان-بردسیر و بافت-رابر-برزویه استفاده شد. مدل ۲۰۱۰-۲۰۲۰ با ضریب کاپای ۰/۹۴ و دقت کلی ۰/۹۸ به‌عنوان مدل منتخب این شبیه‌سازی به کار گرفته شد. درنهایت هم‌پوشانی تغییرات کلاس‌های پوشش اراضی در چهار سناریو با برنامه توسعه بخش کشاورزی در سند آمایش استان کرمان انجام شد و سهم نیروهای محرکه تغییرات کاربری نیز محاسبه گردید. سرانجام تناسب عرضه و تقاضای خدمات اکوسیستمی بر مبنای تغییرات کلان اقلیمی، برای منطقه مدل‌سازی شد.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که اراضی تحت ساخت‌وساز انسانی بیش‌ترین درصد تغییرات را طی بازه زمانی موردمطالعه داشته است. به دلیل اقلیم گرم و خشک منطقه، افزایش زمین‌های تحت کشت و کار همسو با افزایش جمعیت در این منطقه صورت نگرفته است. همچنین نقشه پتانسیل توسعه هرکدام از کلاس‌های پوشش اراضی در منطقه موردمطالعه نشان از تغییرات قابل‌توجه اراضی کشاورزی و اراضی انسان-ساخت می‌باشد. در خصوص اثر نیروهای محرکه، بسته به نوع کاربری هریک از عوامل محرکه سهم متفاوتی بر مقدار تغییرات را نشان داد. عوامل ارتفاع، بارندگی و دما به ترتیب با ضرایب ۰/۴۵، ۰/۳۵ و ۰/۱۵، مهم‌ترین عوامل و نیروهای مؤثر بر تغییرات کاربری اراضی در منطقه موردمطالعه بودند. مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی همسو با سناریوهای تغییر اقلیم نشان داد که برنامه‌ی طراحی‌شده با هیچ‌کدام از سناریوهای محتمل انطباق نداشته و از این حیث برنامه طراحی‌شده دارای عدم تعادل فضایی است. در نتیجه، این بخش با تغییرات اقلیمی محتمل در این منطقه سازگاری ندارد، که این امر در قالب مقایسه عرضه از طریق تولید در اراضی کشاورزی و تقاضا از طریق افزایش جمعیت انسانی در منطقه منتج شد.

نتیجه‌گیری: تلفیق عوامل اقتصادی و اجتماعی و محیطی برای پیش‌بینی کاربری‌های اراضی در جهت اجرای توسعه پایدار ضروری است و مدل‌های یادگیری ماشین برای شبیه‌سازی تغییرات پوشش اراضی و تخمین عرضه محیطی، این امکان را فراهم می‌آورد تا بتوان برنامه‌های آمایشی را مورد ارزیابی قرار داد و برای سناریوهای مختلف مخصوصاً در اراضی فوق گرم و خشک انعطاف لازم را ایجاد نمود تا از طریق سازگاری، بتوان به اهداف توسعه پایدار در این مناطق دست یافت.

واژه‌های کلیدی: آمایش سرزمین، تعادل فضایی، سازگاری، اراضی خشک، پوشش اراضی.

استناد به این مقاله: *کرمی، ح.، سیاح‌نیا، ر. و برق جلوه، ش. ۱۴۰۴. ارزیابی برنامه آمایش سرزمین با رویکرد نظارت بر عرضه و تقاضای خدمات اکوسیستمی در سناریوهای مختلف تغییرات اقلیمی. فصلنامه علوم محیطی نوین. ۲۳(۳): ۷۸۹-۸۰۸.*

* **Corresponding Author Email Address:** r_sayahnia@sbu.ac.ir
DOI: 10.48308/envs.2025.237337.1454

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

مقدمه

هم‌زمان با توسعه صنعتی ارتباط تنگاتنگی بین درصد شهرنشینی و توسعه‌یافتگی کشورها شکل‌گرفته به‌نحوی‌که پیش‌بینی می‌شود تا ۲۰۵۰ بیش از ۷۰ درصد جمعیت جهان شهری باشد (Davis and Keating, 2015)؛ که این موضوع از مهم‌ترین چالش‌ها و ریشه‌های مشکلات مرتبط با توسعه پایدار فضایی به شمار می‌رود (Batara Surya *et al.,* 2020). رشد شهرنشینی به معنی انتقال منابع از سایر بخش‌ها و به‌ویژه بخش کشاورزی به سمت شهرها هست که مشکلات فراوان محیطی و اقتصادی-اجتماعی را به وجود آورده است (Batara Surya *et al.,* 2020; Kashef *et al.,* 2023). ازجمله مهم‌ترین این مشکلات که درنتیجه‌ی افزایش فشار بر منابع محیطی به وجود آمده است انواع آلودگی‌ها، کمبود منابع و تخریب زمین است (Wang *et al.,* 2018).

از طرف دیگر کلان‌روندهایی همانند تغییر اقلیم تأثیر بسیار شدیدی بر روی بخش‌های مختلفی همچون خدمات اکوسیستم و زیستگاه‌های انسانی و زیرساخت‌ها خواهند داشت که این اثرات در کشورهای خشک درحال‌توسعه با سطح درآمدی پایین بسیار شدیدتر است (Sarkodie and Strezov, 2019). مقیاس عملکرد و تأثیرگذاری این روندها فراتر از مقیاس منطقه برنامه‌ریزی‌شده است و در برخی موارد کل جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Gebalska, 2017). اثرات منفی تغییر اقلیم در بلندمدت شامل افزایش تقاضا برای خدمات، تخریب زیرساخت‌ها، تخریب زیستگاه و مهاجرت و جابجایی جمعیت می‌شود (Howes *et al.,* 2018; Ebrahimi *et al.,* 2022). بنابراین یکی از مهم‌ترین اثرات تغییر اقلیم، تهدید امنیت غذایی از طریق کاهش زمین‌های قابل‌کشت برای کشاورزی بوده است که هم‌زمان با افزایش جمعیت، می‌تواند منجر به کاهش دسترسی پایدار به منابع غذایی شود (Doelman *et al.,* 2018). در این خصوص کاهش منابع آب شیرین، فشار بر مناطق خشک مانند کرمان، و ایجاد مشکلات جدی در کشاورزی و تأمین آب شرب (Sharifi *et al.,* 2019) همچنین تهدیدهای ناشی افزایش دما و کاهش بارش‌ها بر امنیت غذایی و در نهایت با فرسایش خاک و کاهش کیفیت زمین‌های کشاورزی به تغییرات کاربری اراضی و کاهش قابلیت‌های اراضی منجر شده است (Chegnizadeh *et al.,* 2023). این امر لزوم برنامه‌ریزی فضایی پایدار و سازگار با تغییرات را دوچندان می‌کند. برنامه‌ریزی فضایی راهبردی، ذاتاً یک برنامه بلندمدت است و همین موضوع باعث می‌شود این برنامه‌ها شدیداً تحت تأثیر نیروهای محرکه و تغییرات محیطی، اقتصادی و اجتماعی قرار گیرند (Sarkodie and Strezov, 2019). بنابراین یکی از ویژگی‌های برنامه فضایی راهبردی و از طرفی یکی از لازمه‌های برنامه‌ریزی مؤثر و کارا در راستای توسعه فضایی پایدار، بهره‌گیری از یک رویکرد سازگاری[1] است (Hersperger *et al.,* 2018; Nadin *et al.,* 2021). در این نوع برنامه‌ها تغییرات محیطی مانند تغییرات اقلیمی، تغییر سیاست‌های اقتصادی و اجتماعی ممکن است منجر به انتخاب بهترین روش یا تغییر رویه و یا در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های زمانی و فضایی برای سازگاری شود که تماماً بسته به اطلاعات و دانش کافی ما در این حیطه برای تصمیم‌گیری دارد (Douvere and Ehler, 2011; Jalota *et al.,* 2018).

بنابراین بخش قابل‌توجهی از مشکلات به وجود آمده در راستای دستیابی به اهداف سازگاری در یک برنامه توسعه فضایی، پویایی محیط و عدم قطعیت‌های فزاینده یا سناریوهای مختلف است؛ همین موضوع باعث شده است تا برنامه‌ریزان به سمت برنامه‌ریزی منعطف (یا سازگار) هدایت شوند و این انعطاف‌پذیری از طریق مکانیسم‌های نظارت و ارزیابی قابل‌دستیابی است (Amado and Cavaco, 2015). بنابراین استفاده از رویکرد اثربخشی برای ارزیابی توسعه فضایی، به مفهوم ارزیابی میزان سازگاری برنامه توسعه فضایی با کلان‌روندها و سایر عوامل

دخیل در تغییر ساختار فضایی یک منطقه نیز هست. بدین مفهوم که اثرات تجمعی حاصل از بروندادهای مختلف یک برنامه (حاصل از برنامه با لحاظ عوامل بیرونی) به‌صورت مستتر انعکاس‌دهنده‌ی میزان سازگاری یک برنامه توسعه-ی فضایی است. سازگاری در برنامه‌ریزی فضایی می‌تواند شامل تغییر اهداف، چشم‌انداز و یا اقدامات جایگزین باشد و به شناسایی خلأهای اطلاعاتی کمک کند (Nadin *et al.*, 2021). ارزیابی و پایش برنامه‌های توسعه فضایی می‌تواند اثرات پیش‌بینی‌نشده تغییرات محیطی مخرب مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای را شناسایی کند (Wang *et al.*, 2018).

از طرفی کاربری اراضی از فاکتورهای بسیار مهم در برنامه-ریزی فضایی (Friedlingstein *et al.*, 2022)، چراکه میزان تولید غذا، خدمات اکوسیستمی و نیازهای یک جامعه را در جهت دستیابی به یک توسعه پایدار مشخص می‌کند (Bey *et al.*, 2020). عوامل متعدد اقتصادی-اجتماعی و برنامه‌های توسعه فضایی باعث ایجاد تغییرات در نحوه بهره‌برداری و درنتیجه تغییرات کاربری زمین می‌شود که ممکن است برخی از آن‌ها ملموس و برخی غیرملموس باشند (Oliveira and Meyfroidt, 2022). از طرفی ارتباط تنگاتنگی بین تغییرات آب و هوایی و تغییرات کاربری اراضی وجود دارد که مطالعه و بررسی ارتباط بین آن‌ها از طریق مدل‌های ریاضی و آماری، بخش مهمی از تحقیقات محیط زیستی را شامل می‌شود (Zhang *et al.*, 2017). نیروهای محرکه تغییر کاربری (ازجمله تغییر اقلیم) بسته به مقیاس و منطقه متفاوت عمل می‌کنند و تعادل عرضه و تقاضای خدمات اکوسیستمی را برای توسعه پایدار و سازگار مشخص می‌کند (Meyfroidt *et al.*, 2018; Schulte *et al.*, 2021). بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که مطالعات موجود عمدتاً به ارزیابی و پایش برنامه‌های توسعه فضایی در مناطق محدود و با رویکردی یک‌بعدی پرداخته‌اند. همچنین، شکاف‌های دانشی در ارزیابی سازگاری برنامه‌ها با سناریوهای تغییرات اقلیمی وجود دارد. توجه به تأثیرات اقلیمی بر برنامه‌ریزی فضایی، به‌ویژه در مناطق حساس، اهمیت ویژه‌ای دارد. این پژوهش به دنبال پرکردن این شکاف‌ها و ارائه یک چارچوب هوشمند برای ارزیابی و پایش برنامه‌های توسعه فضایی است.

در ایران، با اقلیمی عموماً خشک و نیمه‌خشک این امر از حساسیت بالاتری برخوردار است. سرزمین ایران و به‌ویژه مناطق شرقی با اقلیمی خشک و متوسط بارندگی بین ۵۰ تا ۳۵۰ میلی‌متر، در مقابل تغییرات محیطی و به‌ویژه تغییر اقلیم بسیار شکننده هستند. بر اساس تحقیقات یک رژیم آب و هوایی خشک همراه با کاهش بارش به‌ویژه در فصل گرم در مناطق خشک بر ایران حاکم خواهد شد (Ghiami-Shomami *et al.*, 2018)؛ به‌نحوی‌که با افزایش متوسط دمای ۲/۶ درجه سانتی‌گراد و کاهش ۳۵ درصدی بارش سالیانه در دهه‌های آتی همرا است (Mansouri *et al.*, 2019). درنتیجه این تغییرات و کلان‌روندهای دیگر محیطی و غیر محیطی با آثار منفی و یا مثبت بر توسعه فضایی مناطق و اهداف مدنظر تأثیرگذار خواهند بود و برنامه‌های فضایی راهبردی بایستی بر مبنای سازگاری طراحی شوند. تلفیق مفاهیم مدیریتی با برنامه آمایشی و ارزیابی آمایش سرزمین با استفاده از علوم مختلف به سیاست‌گذاران در اتخاذ تصمیمات علمی و بهینه کمک می‌کند. انعطاف‌پذیری در برنامه‌های توسعه فضایی با سازگاری با تغییرات محیطی، مدیران را قادر می‌سازد برنامه‌ها را با چالش‌های جدید سازگار کنند. هوشمندسازی فرآیندهای پایش و ارزیابی آمایش سرزمین به دقت و کارایی ارزیابی‌ها کمک کرده و به تصمیمات بهتر در سطح منطقه‌ای و ملی منجر می‌شود. بنابراین چالش بزرگ برای برنامه‌ریزی فضایی این است که چگونه این عدم قطعیت‌ها را در برنامه‌های خود ادغام کرده و با تغییرات محیطی و اقتصادی-اجتماعی یا نیروهای محرکه خارجی خود را تطبیق دهد و از انعطاف‌پذیری کافی برخوردار باشد (Kashef *et al.*, 2023). لذا این پژوهش به

بررسی سازگاری برنامه‌های آمایشی با تغییرات اقلیمی می‌پردازد و هدف آن سنجش این سازگاری با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین و داده‌های منطقه‌ای در مناطق گرم و خشک استان کرمان است.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

در این پژوهش بخش مرکزی استان کرمان برای مطالعه موردی و پیاده‌سازی یافته‌های پژوهش انتخاب‌شده است. استان کرمان با ۱۵/۱۱ درصد از مساحت کل کشور به‌عنوان پهناورترین استان کشور محسوب می‌شود. این استان جنوب شرقی کشور و در پس‌کرانه منطقه بسیار مهم و راهبردی مکران قرار دارد. این وسعت باعث ایجاد تنوع اقلیمی و محیطی فراوانی در این استان شده است. همچنین به دلیل موقعیت ویژه از نقش بسیار مهمی در ترانزیت و حمل‌ونقل برخوردار است. وجود منابع غنی معدنی و از طرفی اقلیم خشک و شکننده باعث حساسیت‌های محیطی و ملاحظات مرتبط با این موضوع شده است. دو منطقه برنامه‌ریزی در استان کرمان شامل منطقه برنامه‌ریزی کرمان-بردسیر و بافت-رابر-برزویه که در سند آمایش این استان مشخص‌شده است به‌عنوان مطالعه موردی در این پژوهش انتخاب و مدل طراحی‌شده با استفاده از داده‌های این مناطق پیاده‌سازی شده است.

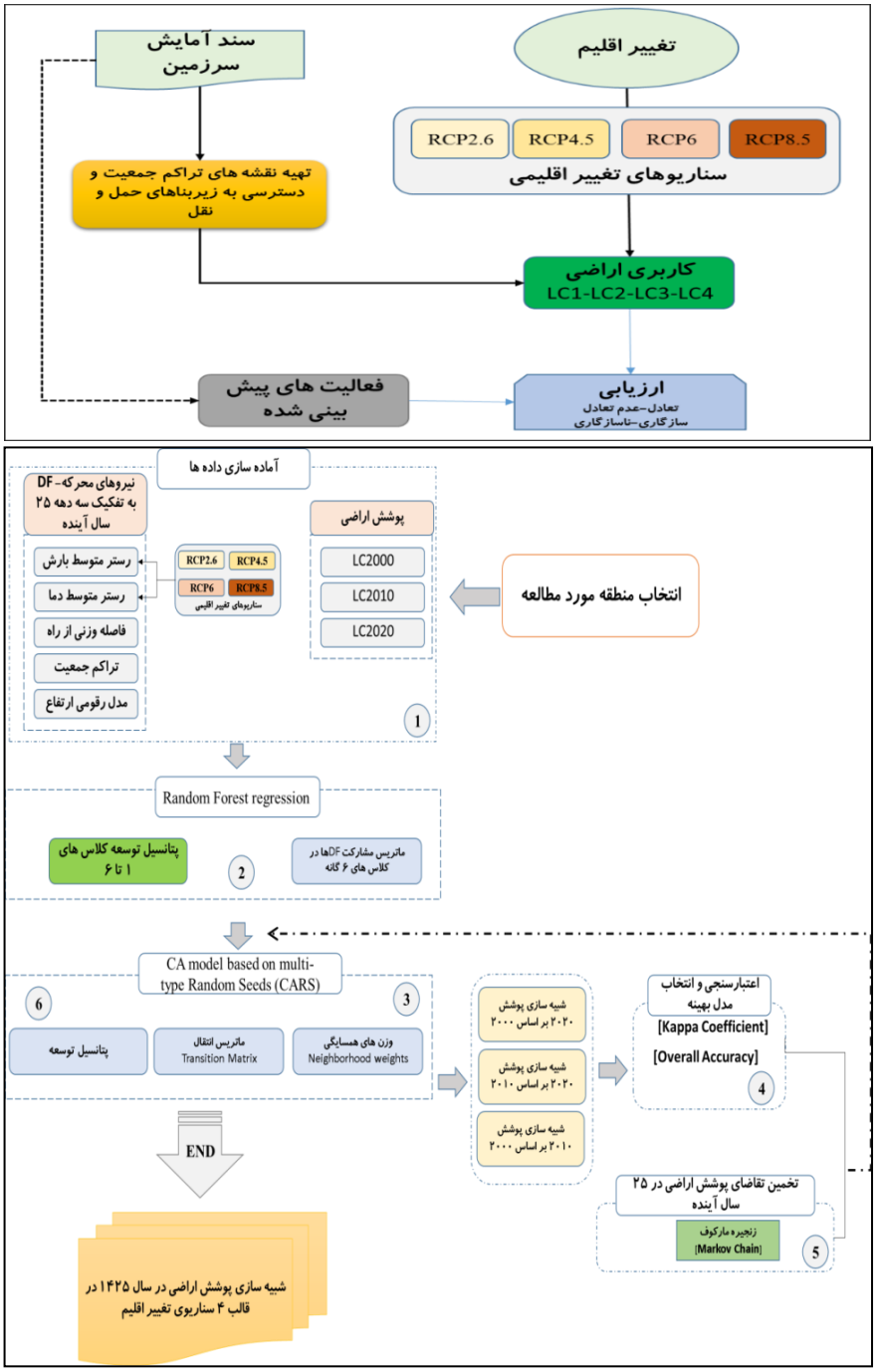
مراحل انجام پژوهش

در این پژوهش به‌منظور ارزیابی یک برنامه توسعه فضایی از مفهوم انطباق عرضه-تقاضا از منظر کاربری موردنیاز(تقاضا) و کاربری محتمل (عرضه) استفاده‌شده است. بدین مفهوم که با استفاده از اطلاعات وضع موجود و اطلاعات مستخرج از برنامه آمایش سرزمین و سناریوهای تغییر اقلیم نقشه‌های پوشش اراضی در افق برنامه آمایش شبیه‌سازی‌شده و بر اساس نقش‌ها و کاربری‌های طراحی‌شده در سند آمایش منطقه، نحوه ارزیابی سند آمایش ارائه‌شده است.

شبیه‌سازی کاربری اراضی

در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های یادگیری ماشین[۲] به‌منظور مدل‌سازی کاربری/پوشش زمین[۳] و بهبود آن‌ها، این امکان را فراهم کرده است که تغییرات آینده کاربری/پوشش زمین مدل‌سازی شود (Wang *et al.*, 2022a). الگوریتم‌های یادگیری ماشین قادر هستند مسائل پیچیده را از طریق ورودی‌ها مختلف حل کنند و ازآنجایی‌که داده‌های کاربری/پوشش زمین که مقیاس اسمی و ترتیبی دارند، این روش‌ها به‌صورت ناپارامتریک بوده و نسبت به روش‌های سنتی پارامتریک دقیق‌تر و مناسب‌تر است (Ngoy and Shebitz, 2021). مدل PLUS به دلیل دقت بالاتر در شبیه‌سازی توزیع انواع پوشش‌های اراضی، به ویژه پوشش‌های طبیعی، نسبت به مدل‌های دیگر مانند Logistic-CA، ANA-CA، CLUE_S، CLUMondo و FLUS انتخاب شده است. مدل PLUS قادر است با استفاده از الگوریتم Random Forest، کاربری آینده را با دقت بیشتری پیش‌بینی کند (Wang *et al.*, 2022). الگوریتم Random Forest به دلیل توانایی بالای خود در مدیریت داده‌های پیچیده و ارائه پیش‌بینی‌های دقیق، انتخاب شده است. این الگوریتم از قابلیت‌های بالای پردازش داده‌ها و شناسایی الگوهای پیچیده برای پیش‌بینی دقیق‌تر استفاده می‌کند (Breiman, 2001). در این پژوهش، الگوریتم‌های یادگیری ماشین که در مدل PLUS پیاده‌سازی شده‌اند، برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی نقشه پوشش اراضی در افق زمانی ۲۵ ساله آینده استفاده شده است (شکل ۱). همچنین، مقایسه بین مدل‌های مختلف نشان داد که مدل PLUS با استفاده از الگوریتم Random Forest توانسته است نتایج بهتری در شبیه‌سازی کاربری اراضی ارائه دهد. معیارهای مقایسه شامل دقت پیش‌بینی، قدرت تعمیم‌دهی و توانایی مدل در مدیریت داده‌های پیچیده را شامل شد.

برای شبیه‌سازی کاربری اراضی از مدل PLUS و الگوریتم جنگل تصادفی (Random Forest) با پارامترهای زیر استفاده شد (جدول ۱).



شکل ۱- نمای کلی تحقیق (بالا) و فرآیند شبیه‌سازی پوشش اراضی در سال ۱۴۲۵ (پایین)

Fig. 1- The schematic view of the research (top) and the simulation process of land cover in 2046 (bottom)

جدول ۱- پارامترهای Random Forest در مدل PLUS

Table 1. Random Forest parameters in PLUS model

پارامتر	مقدار
Number Of Regression Tree	۲۰
Sample Rate:0.01	۰.۱
Mtry	۵

این پارامترها با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل و آزمایش‌های تجربی تنظیم‌شدند تا بهترین نتایج پیش‌بینی و شبیه‌سازی پوشش اراضی حاصل شود. انتخاب این پارامترها با هدف دستیابی به تعادل بین دقت، کارایی محاسباتی و جلوگیری از بیش‌برازش انجام شد.

نیروهای محرکه تغییر کاربری اراضی

در این پژوهش از پنج لایه اطلاعاتی به‌عنوان نیروهای محرکه تغییر پوشش زمین به شرح زیر استفاده‌شده است:

۱. محاسبه میانگین دما و بارش ده‌ساله در سه دهه ۱۳۷۰، ۱۳۸۰ و ۱۳۹۰،
۲. فاصله وزنی از راه‌ها به ترتیب آزادراه، بزرگراه و راه اصلی و راه‌آهن،
۳. اطلاعات مربوط به تراکم جمعیت در سطح دهستان با استفاده از داده‌های سرشماری برای سه دهه و تخمین جمعیت در مطالعات آمایش.

تعیین کلاس‌های اصلی کاربری اراضی

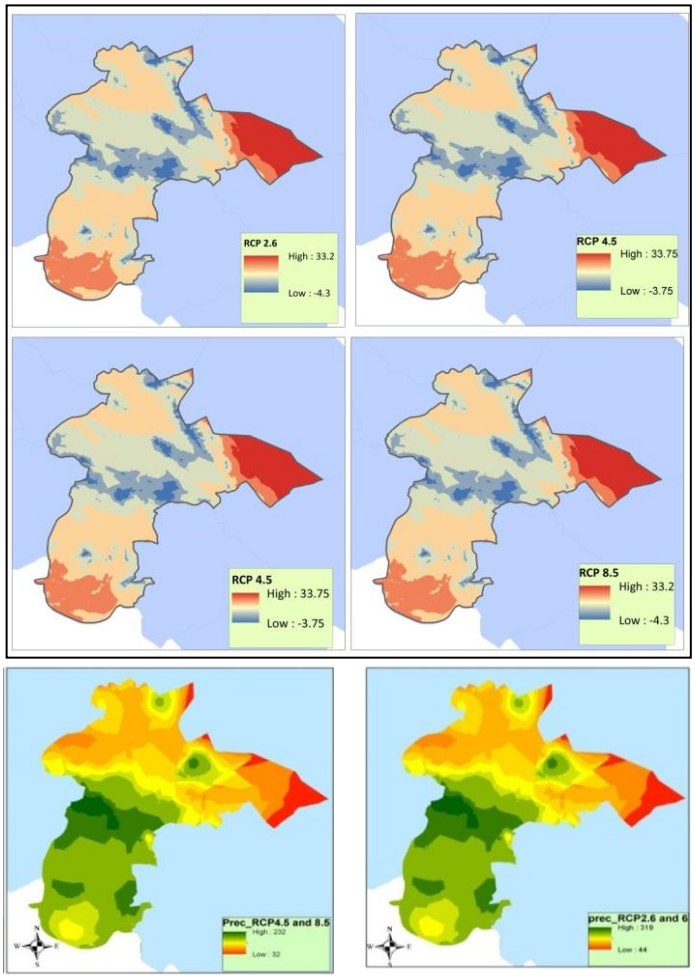
هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم چهار سناریو به نام‌های $RCP_{2.6}$، $RCP_{4.5}$، RCP_{6} و $RCP_{8.5}$ طراحی و گزارش نموده است (IPCC, 2014). مقدار بارش به ترتیب با ۱۰+، ۲۰-، ۱۰+ و ۲۰- درصد تغییر و مقدار دما نیز به میزان ۰/۷+، ۱/۲۵+، ۱/۵+ و ۲/۵+ درجه به ترتیب برای هر یک از سناریوها تعریف‌شده است. متغیرهای اقلیمی مورداستفاده در این پژوهش با استفاده از سناریوهای مذکور در گزارش پنجم IPCC برای افق مدنظر (۱۴۲۵) که توسط سازمان هواشناسی کشور برای دهه‌های مختلف شبیه‌سازی‌شده است، مورداستفاده قرارگرفته است. سپس با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و با استفاده از ابزارهای تحلیل فضایی، نقشه‌های متوسط بارش و دما در ۴ سناریوی فوق مربوط به سال ۱۴۲۵ محاسبه شد. نقشه پیش‌بینی پراکنش مقدار بارش برای چهار سناریو $RCP_{2.6}$، $RCP_{4.5}$، RCP_{6} و $RCP_{8.5}$ و تغییرات پیش‌بینی‌شده برای هر جفت سناریو با کاهش چشمگیر در مقدار بارش مخصوصاً برای مناطق شمال غربی منطقه به‌وضوح نشان داده‌شده است (شکل ۲).

یکی از جنبه‌های مربوط به مدل‌سازی تغییرات اراضی، توجه به توزیع جمعیت و ساختار فضایی طراحی‌شده در یک برنامه توسعه فضایی است (Hersperger *et al.*, 2018) که نقش مهمی در توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل، نقش مؤثری در تغییرات کاربری اراضی در آینده دارند (Msofe *et al.*, 2019; Batara Surya *et al.*, 2020).

بر اساس داده‌های سرشماری سه دهه گذشته و بر اساس برآوردهای سند آمایش استان کرمان، نقشه‌های تراکم جمعیت مربوط به این چهار بازه زمانی تهیه شد. همچنین به‌منظور مدل‌سازی و استفاده از داده‌های سری زمانی ساختار فضایی منطقه مطالعاتی، زیرساخت‌های حمل‌ونقل شامل آزادراه‌ها، بزرگراه‌ها، راه‌های اصلی و خطور ریلی این منطقه در سه دهه مربوط به ۱۳۷۵، ۱۳۸۵، ۱۳۹۵ و همچنین افق ۱۴۲۵ تهیه و بر اساس آن نقشه‌های دسترسی فضایی به آن تهیه شد (شکل ۳).

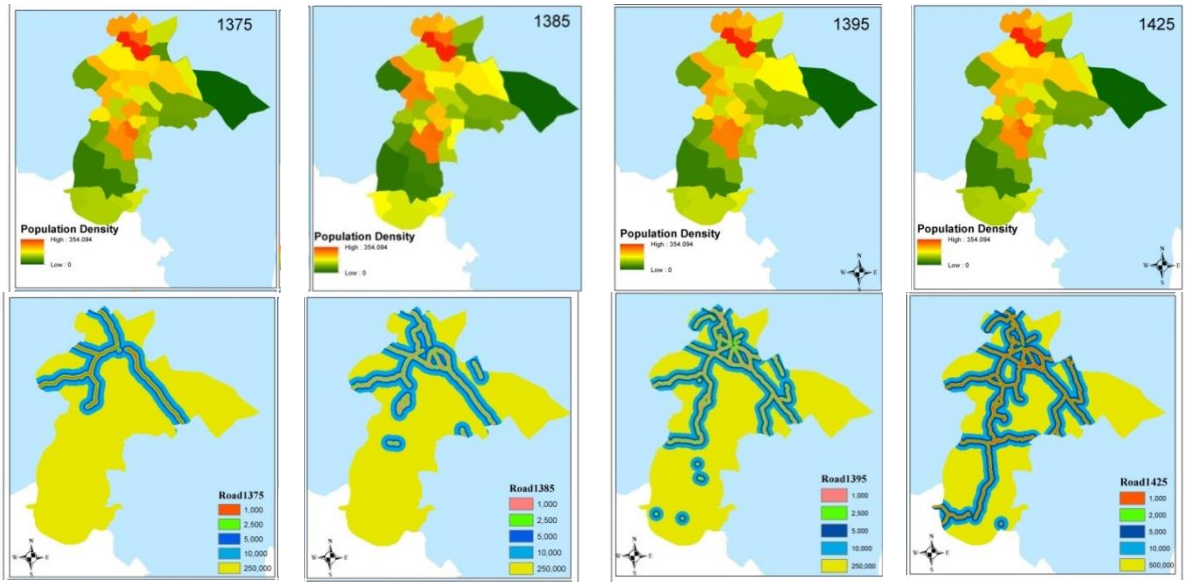
برای استخراج این لایه‌ها و مطالعه کلاس‌های کاربری از الگوریتم RFR[4] استفاده شد. و به‌منظور انتخاب مدل مناسب برای شبیه‌سازی پوشش زمین در آینده، از کاربری‌های سه دهه و به‌صورت دوبه‌دو استفاده شد و مدل بهینه بر اساس کمترین ضریب خطا انتخاب شد. به همین منظور با استفاده از مدول LEAS، پتانسیل توسعه هرکدام از کلاس‌های پوشش اراضی تهیه شد.

با استفاده از مدل RFR و لایه‌های نیروی محرکه[5] میزان تأثیرپذیری تغییرات پوشش اراضی یا به‌عبارتی‌دیگر میزان مشارکت[6] هرکدام از نیروهای مذکور در شکل‌دهی و تعیین هر یک از کلاس‌های پوشش زمین نیز محاسبه شد. نحوه سنجش سازگاری برنامه آمایش با تغییرات اقلیمی از طریق انطباق تغییرات محتمل با برنامه‌های متناظر هر بخش انجام شد (شکل ۴).



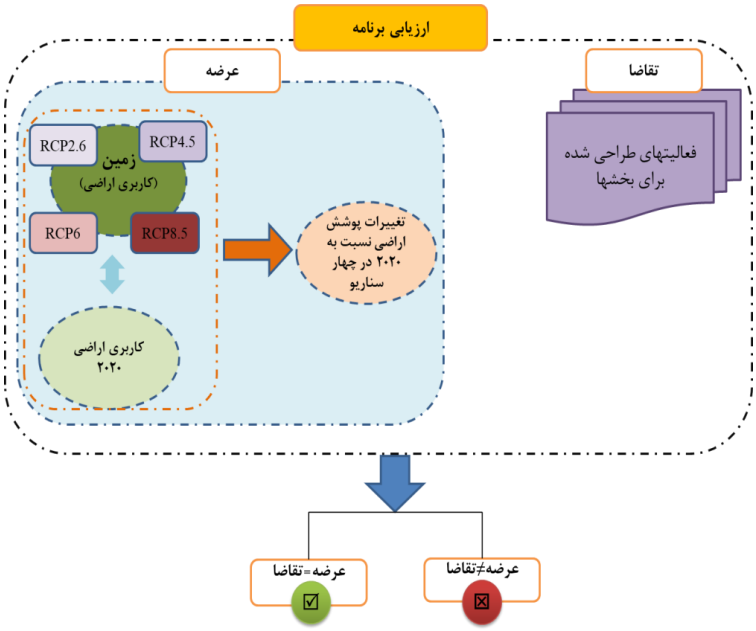
شکل ۲- نقشه متوسط دما (بالا) و متوسط بارندگی (پایین) در سال ۱۴۲۵ بر اساس سناریوهای چهارگانه IPCC

Fig. 2- Average temperature map (Top) and rainfall map (Bottom) in 2046 based on four IPCC scenarios



شکل ۳- تراکم جمعیت (بالا)، دسترسی به زیرساخت‌های ارتباط زمینی (پایین) طی سال‌های ۱۳۷۵، ۱۳۸۵، ۱۳۹۵ و افق ۱۴۲۵

Fig. 3- Population density (top), access to land communication infrastructure (bottom) during the years 1996, 2006, 2016 and 2046



شکل ۴- فرآیند ارزیابی برنامه آمایش از منظر سازگاری با تغییر اقلیم

Fig. 4- The evaluation process of the study program from the perspective of adapting to climate change

خدمات اکوسیستمی

تولید غذا

ارزیابی خدمات اکوسیستمی با کمک بسته نرم‌افزاری InVEST3.9، انجام شد. تقاضا برای غذا، میزان تولید برداشت‌شده مورد انتظار یا مطلوب (تن بر هکتار در سال) است (La Notte *et al.*, 2017). گندم و برنج اصلی‌ترین غله در رژیم غذایی مردم منطقه است ازاین‌رو میزان مصرف این غلات در واحد سطح به‌عنوان تقاضای اصلی غذا و ترکیب آن با تراکم محاسبه گردید (رابطه ۱):

$$DGY = Denpop * Peru + Denpop * Perr \quad (۱)$$

DGY تقاضای مصرف غلات به‌عنوان تقاضای غذا است، Denpop تراکم تعداد جمعیت، Peru سرانه مصرف غلات در شهر و Perr سرانه مصرف غلات در مناطق روستایی است. Denpop *Peru تقاضا برای تولید گندم برای ساکنان شهر و Denpop * Perr تقاضا برای تولید گندم برای ساکنان روستا است.

ذخیره کربن

ذخیره کربن با طبقات مختلف کاربری اراضی مرتبط می‌شود و فرض بر این است که هر طبقه کاربری اراضی در یک تعادل و موازنه ذخیره در هر زمان باشد. در این مدل، ذخیره کربن خشکی در پنج منبع ذخیره کربن شامل: ۱) بیومس روزمینی، ۲) بیومس زیرزمینی، ۳) خاک، ۴) سایر مواد آلی و ۵) تولیدات چوبی برداشت‌شده (HWPs) قرار دارد. کربن ذخیره‌شده در یک پارسل در زمان t، C_{xt}، با واحد متریک تن C، برابر است با جمع کربن ذخیره‌شده در هر منبع ذخیره در پارسل موردبررسی در زمان t است (رابطه ۲):

$$C_{xt} = C_{pxt} + \sum_{j=1}^{J} A_{xjt}(C_{aj} + C_{bj} + C_{sj} + C_{oj})' \quad (۲)$$

که در این رابطه Cxt کربن ذخیره‌شده در پیکسل موردبررسی در زمان t می‌باشد که برابر با مجموع کربن ذخیره‌شده در منابع ذخیره کربن شامل ماده آلی مرده Csj، بیومس روی زمین Cbj، زیست‌توده زیرزمین Caj و خاک Coj می‌باشد. J نشان‌دهنده کاربری زمین و Axjt مساحت کاربری در پیکسل x در زمان t است. همچنین Cpxt برابر با تولیدات چوبی برداشت‌شده می‌باشد. برای تعیین متریک تن C ذخیره‌شده در کل سیمای سرزمین در زمان t، که با $C_{t'}$ نشان داده می‌شود، ذخیره کربن کل پارسل‌ها را جمع می‌شود (Sharp *et al.*, 2014) (رابطه ۳).

$$C_t = \sum_{x=1}^{x} C_{xt'} \quad (۳)$$

C_{aj}، C_{bj}، C_{sj} و C_{oj} به ترتیب متریک کربن ذخیره در هر هکتار منابع ذخیره روزمینی، زیرزمینی، خاک و ماده آلی در هر طبقه LULCj (کاربری/پوشش اراضی) هستند، بطوریکه j=1,2…., j طبقات مختلف کاربری اراضی است. میزان کربن رو زمینی، زیرزمینی، خاک و لاشبرگ از مطالعات منتخب به تفکیک طبقات کاربری اراضی جنگل، مرتع و کشاورزی استخراج شدند. و نهایتاً میزان تولید کربن که به نوعی تقاضای کربن محسوب می‌شود محاسبه شد (رابطه ۴)؛

$$Dce = Dc \times pi \qquad (۴)$$

Dce به میانگین تقاضای کربن سالانه (t/hm2) و pi به تراکم فضایی جمعیت شبکه (People/hm2) اشاره دارد.

نتایج و بحث

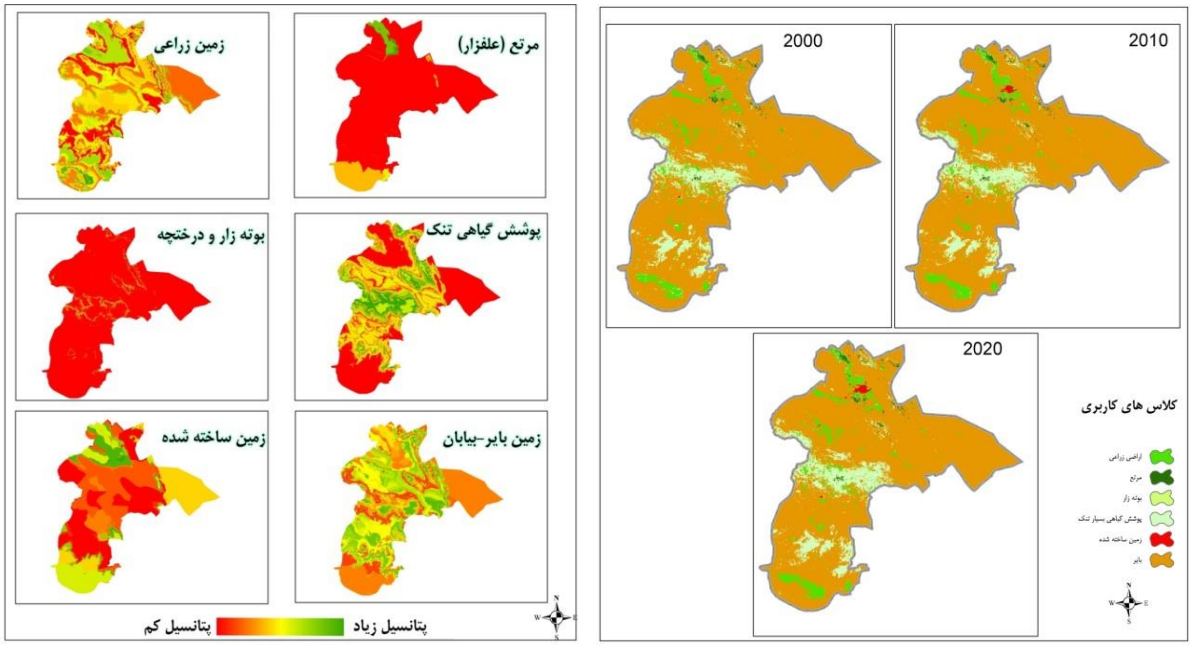
تغییرات کاربری اراضی

کاربری‌های اراضی مربوط به پایان سه دهه ۱۳۷۰، ۱۳۸۰ و ۱۳۹۰ (۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰) مدل‌سازی و خروجی مدل از طریق ارزیابی ضریب کاپا و دقت کلی انجام شد (جدول ۲). مدل مربوط به سال ۲۰۲۰-۲۰۱۰ در هر دو فاکتور مورد ارزیابی‌شده دارای بیش‌ترین دقت بود، که به‌عنوان مدل منتخب برای شبیه‌سازی پوشش اراضی در سال ۱۴۲۵ انتخاب شد. زمین‌های تحت ساخت‌وساز بیش‌ترین درصد تغییرات را طی بازه زمانی نشان می‌دهند. همچنین نقشه پتانسیل توسعه هرکدام از کلاس‌های پوشش اراضی در منطقه موردمطالعه نشان از تغییرات قابل‌توجه اراضی کشاورزی و اراضی انسان-ساخت می‌باشد (شکل ۵).

جدول ۲- ضریب دقت مدل‌های شبیه‌سازی‌شده

Table 2. Accuracy coefficient of simulated models

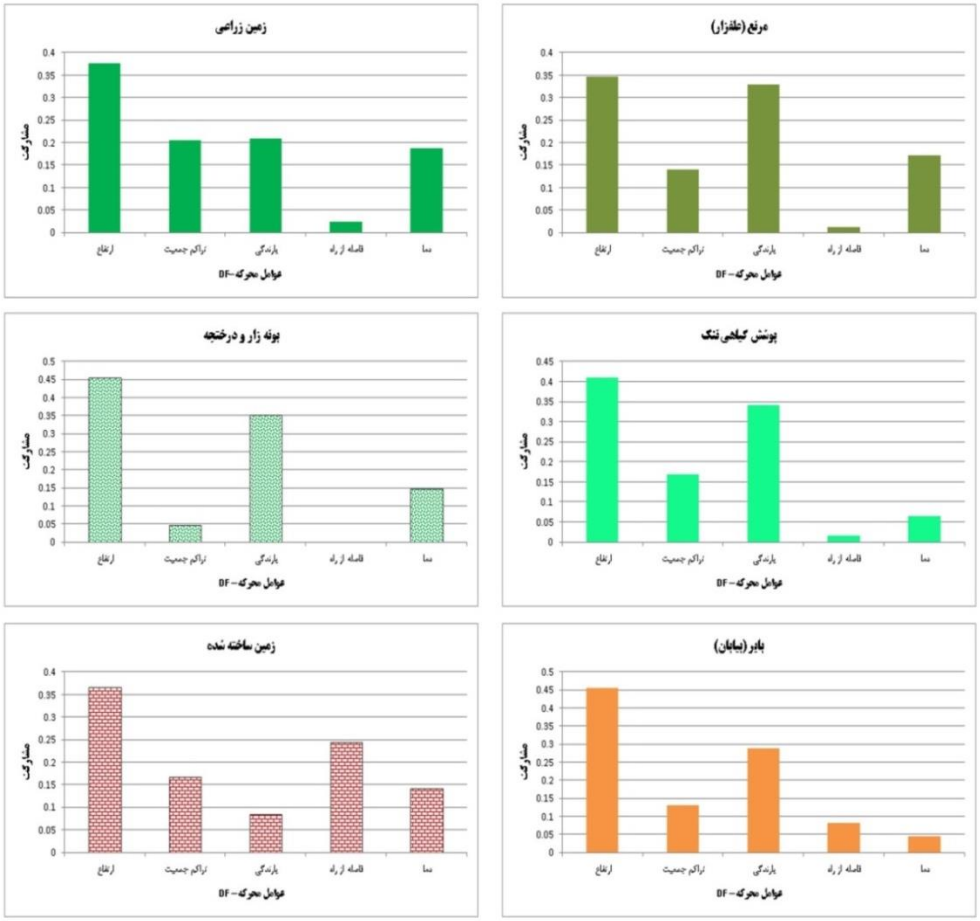
سال/مدل year/model	ضریب کاپا kappa coefficient	دقت کلی Overall accuracy
۲۰۱۰-۲۰۰۰	۰/۹۰۳۶۷	۰/۹۷۱۳۸
۲۰۲۰-۲۰۱۰	۰/۹۴۰۱۱	۰/۹۸۱۱۸
۲۰۲۰-۲۰۰۰	۰/۸۶۰۸۹	۰/۹۵۶۴۱



شکل ۵- نقشه‌های کاربری اراضی در سه مقطع ده‌ساله (راست) و پتانسیل توسعه کلاس‌های پوشش اراضی (چپ)

Fig. 5- Land use maps in three ten-year sections (right) and development potential of land cover classes (left)

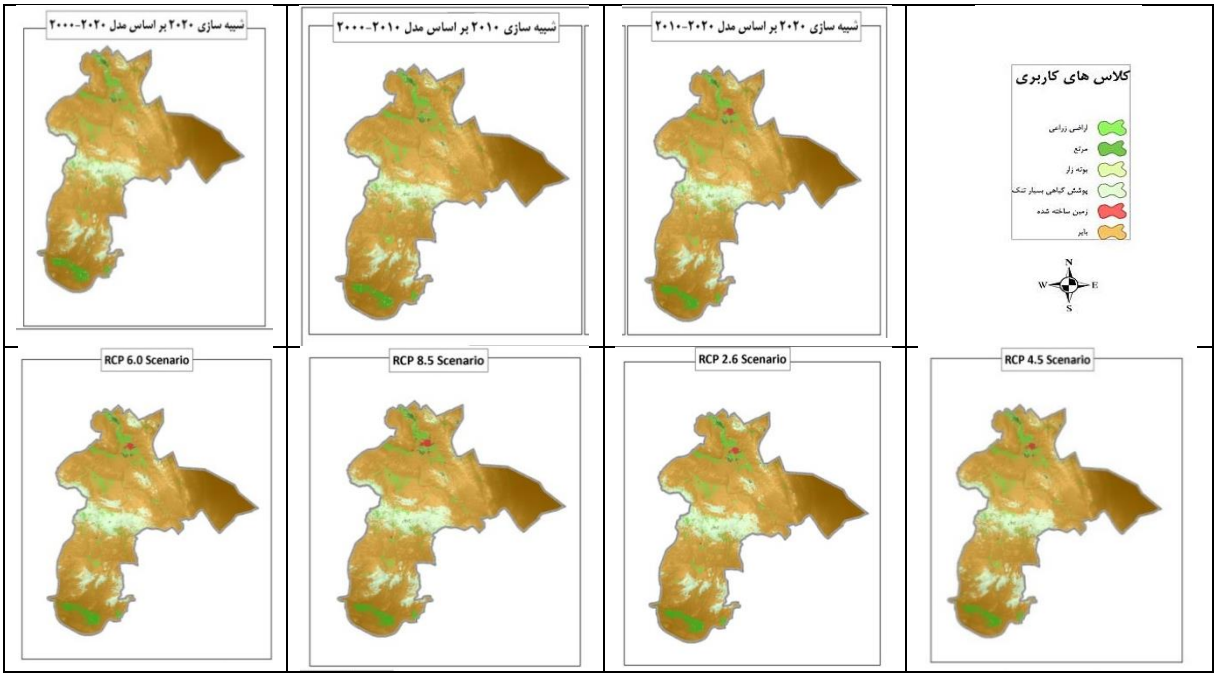
در رابطه با اراضی مرتعی و علفزار مطابق با نتایج، نیروهای ارتفاع، دما و بارندگی سهم بالایی بر تغییرات صورت گرفته در این کاربری در منطقه دارد. کمترین سهم در نیروهای محرکه مربوط به فاصله از راه‌ها می‌باشد. بر اساس نتایج، در زمین‌های تحت پوشش بوته یا درختچه و علفزار، نیروهای محرکه مربوط به فاصله از راه‌ها هیچ تأثیری بر کاربری نداشته است. عوامل ارتفاع، بارندگی و دما به ترتیب با ضرایب ۰/۴۵، ۰/۳۵ و ۰/۱۵، مهم‌ترین عوامل و دارای سهم بالایی بر تغییرات صورت گرفته در این کاربری در منطقه هستند. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که در رابطه با اراضی با پوشش بسیار تنک و پراکنده، فاصله از راه تأثیر بسیار ناچیزی داشته ولی به‌طورکلی عامل ارتفاع و بارندگی بیشترین سهم و تأثیر را بر این طبقه از اراضی در منطقه داشته است. در خصوص اراضی تحت ساخت‌وساز، نیروهای ارتفاع و فاصله از راه بیش‌ترین تأثیر را بر گسترش این کاربری در منطقه موردمطالعه داشته‌اند. به‌طورکلی عامل ارتفاع بیش‌ترین سهم و تأثیر را بر تغییرات اراضی در منطقه داشته است. همچنین در خصوص اراضی بیابانی، نیروهای ارتفاع و بارندگی بیش‌ترین تأثیر را بر گسترش این کاربری در منطقه موردمطالعه داشته‌اند. عامل دما با ضریب نسبتاً کمتری سهم کمی بر تغییرات اراضی در نوع کاربری در منطقه داشته است (شکل ۶). به‌طور مشابه Msofe *et al.*, 2019 نشان دادند که دو دسته نیروی‌های محرکه طبیعی و انسانی بر تغییرات پوشش در دره Kilombero اثرگذارند و عامل بارندگی را مؤثرترین فاکتور گزارش نموده‌اند. لذا در این مناطق خشک، مقدار بارش با اثر مستقیم بر کیفیت محیطی و نیز بر تغییر هر نوع کاربری و مقدار عرضه خدمات اکوسیستم، مقدار تقاضای جمعیت انسانی را در آینده تضمین می‌کند (Kashef *et al.*, 2023).



شکل ۶- میزان سهم هر یک از نیروهای محرکه در کلاس‌های پوشش اراضی ۲۰۲۰-۲۰۱۰

Fig. 6- The share of each driving force in land cover classes 2010-2020

بر اساس نتایج، در داخل یک کلاس پوشش زمین، نقش هریک از نیروهای محرکه با یکدیگر متفاوت بود؛ برای مثال در کاربری زراعی، عوامل ارتفاع، بارش، تراکم جمعیت، دما و فاصله از راه، به ترتیب تعیین‌کننده‌ی توسعه یا کاهش آن هستند. همچنین میزان مشارکت (نقش) هریک از عوامل محرکه در توسعه هریک از کلاس‌های پوشش زمین در مقایسه با یکدیگر متفاوت است. به‌عنوان نمونه نقش عامل بارش در توسعه کلاس مراتع از نقش آن در توسعه زمین‌ساخته شده بالاتر است؛ تقریباً در تمامی کلاس‌های پوشش اراضی، ارتفاع و بارش نقش تعیین‌کننده‌تری را نسبت به سایر عوامل دارند، هرچند در مورد کلاس زمین‌های ساخته‌شده، فاصله از راه‌ها نقش مؤثرتری را نسبت به بارش ایفا می‌نماید (شکل ۷). در بسیاری از تحقیقات گزارش‌شده، بسته به نوع کاربری، نقش عوامل محرکه متفاوت ارزیابی شده است (Msofe *et al.,* 2019; Kashef *et al.,* 2023). مشابه با این نتایج، سایر محققان ازجمله Hermans *et al.,* 2018 و Wang *et al.*, 2022 نیز تغییرات نامتعادل و نامطلوب کاربری اراضی همگام با تغییر اقلیم را گزارش نموده‌اند که موجب ناسازگاری بین عرصه و تقاضای خدمات اکوسیستمی می‌شود. بر این اساس قابلیت اراضی و تخصیص کاربری بر اساس ظرفیت حامل تا حدودی می‌تواند مشکلات پیشروی جوامع را منتفی نماید (Li *et al.,* 2021).



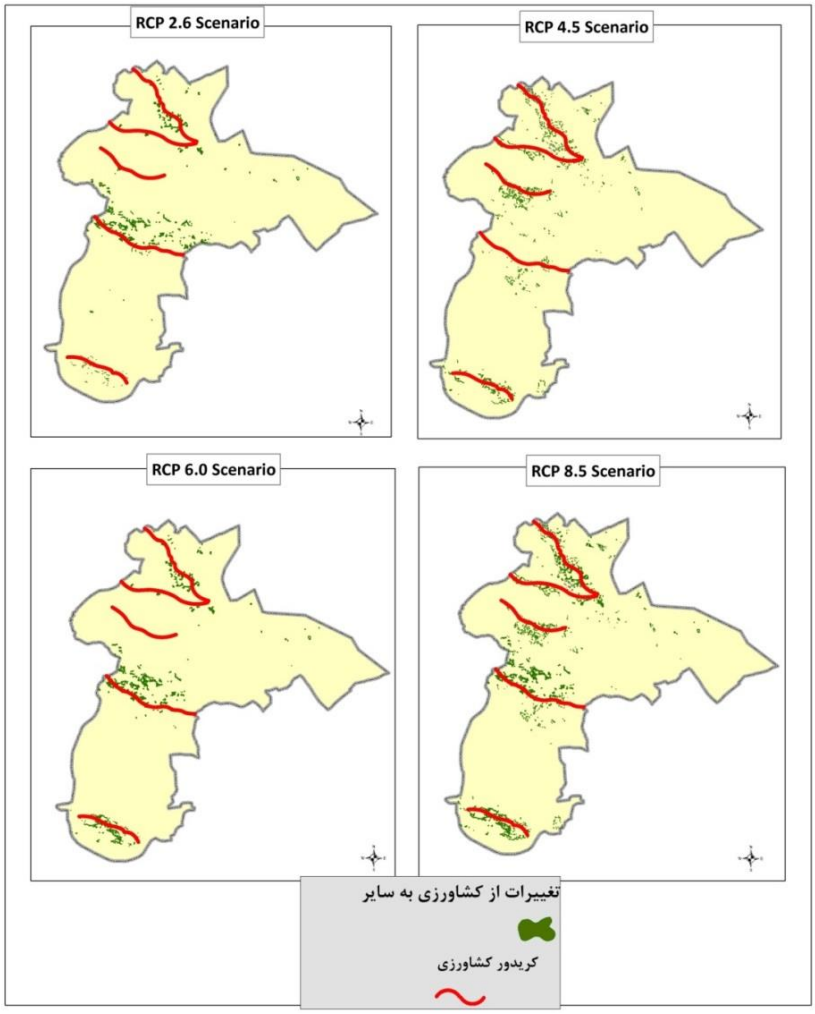
شکل ۷- نقشه پوشش اراضی شبیه‌سازی‌شده در سه حالت مختلف (بالا) و نقشه‌های شبیه‌سازی‌شده پوشش اراضی در سال ۱۴۲۵ در قالب سناریوهای چهارگانه تغییر اقلیم (پایین)

Fig. 7- Simulated land cover map in three different states (top) and simulated land cover maps in ۲۰۴۶ in the form of four climate change scenarios (bottom)

نقشه پیش‌بینی کاربری اراضی بر اساس سناریوهای تغییر اقلیم نشان می‌دهد که بخش مناطق تحت ساخت‌وساز طی زمان نسبت به سایر کاربری‌ها تغییر بیشتری را خواهد داشت (شکل ۷). این امر با تقاضای بیشتر از سمت جمعیت ساکن و کاهش تولید در اراضی مولد همراه خواهد بود. نسبت این عدم تعادل شامل عدم تطابق محیط و ساختار اقتصادی، عدم تطابق ساختار اقتصادی و جمعیت و درنهایت کمبود منابع طبیعی درنتیجه توسعه بی‌رویه و ساخت‌وساز است (Shen *et al.,* 2018).

ارزیابی سازگاری یک برنامه از طریق هم‌پوشانی بین لایه‌ی

تغییرات پوشش اراضی و برنامه‌های بخش مرتبط با آن انجام شد. به‌عنوان نمونه برنامه‌های بخش کشاورزی با تغییرات پوشش زراعی به سایر کاربری‌ها مقایسه و در صورت انطباق، برنامه آمایش در بخش کشاورزی با تغییرات اقلیمی سازگار بوده و در صورت عدم انطباق، ناسازگار است. یافته‌های این پژوهش حاکی از این است که تغییر پوشش زراعی به سایر کاربری‌ها در تمامی سناریوهای چهارگانه انطباق بسیار زیادی با کریدورهای توسعه کشاورزی پیش‌بینی‌شده در سند آمایش استان کرمان دارد (شکل ۸).



شکل ۸- هم‌پوشانی تغییرات پوشش از زراعی به سایر کلاس‌ها با کریدورهای کشاورزی افق در چهار سناریو

Fig. 8- Overlap of cover changes from agricultural to other classes with horizon agricultural corridors in four scenarios

تحت تمام سناریوها عدم تطابق مشهودی بین تغییرات پوشش زراعی به سایر کلاس‌ها و توسعه کریدور کشاورزی طراحی‌شده وجود دارد. این عدم تطابق در سناریوهای مختلف، متفاوت بوده و ملاحظه می‌شود که در سناریوی RCP 8.5 که نسبت به سایر سناریوها اثرات شدیدتری برای تغییر اقلیم پیش‌بینی‌شده است، تمامی کریدورها در مناطقی قرار می‌گیرند که با کاهش سطح پوشش زراعی مواجه خواهند شد. در سه سناریوی دیگر نیز شرایط تقریباً به همین‌گونه است با این تفاوت که در اطراف کریدور میانی طراحی‌شده در منطقه، کاهش پوشش زراعی اتفاق نخواهد افتاد. بنابراین ازاین‌جهت می‌توان نتیجه گرفت که سند آمایش مربوط به این منطقه در بخش کشاورزی و در

هیچ‌کدام از سناریوهای چهارگانه اقلیمی، انطباق و سازگاری لازم را ندارد و بایستی سیاست‌ها و راهبردهای مشخصی برای این عدم تطابق در نظر گرفته شود. در مورد سایر بخش‌ها نیز انطباق میزان سازگاری سند آمایش با اثرات تغییرات اقلیمی بر پوشش اراضی انجام می‌گیرد. همانگونه که کاربری اراضی نقش بسیار مهمی را در تعیین ظرفیت هر منطقه یا به‌عبارتی‌دیگر، میزان عرضه ایفا می‌کند (Kashef *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2022b)، لذا نوع کاربری زمین به‌عنوان عامل مهمی در ساختار فضایی هر منطقه می‌تواند تحت تأثیر عوامل نیروهای محرکه مختلف اقتصادی-اجتماعی، فرهنگی، سیاسی، تکنولوژیکی و طبیعی تغییر کند (Hersperger *et al.*, 2018). برهمین اساس، این تغییر در اراضی در این منطقه منجر به تغییر در میزان عرضه و به‌تبع آن تعادل منطقه‌ای را دچار تغیر می‌کند.

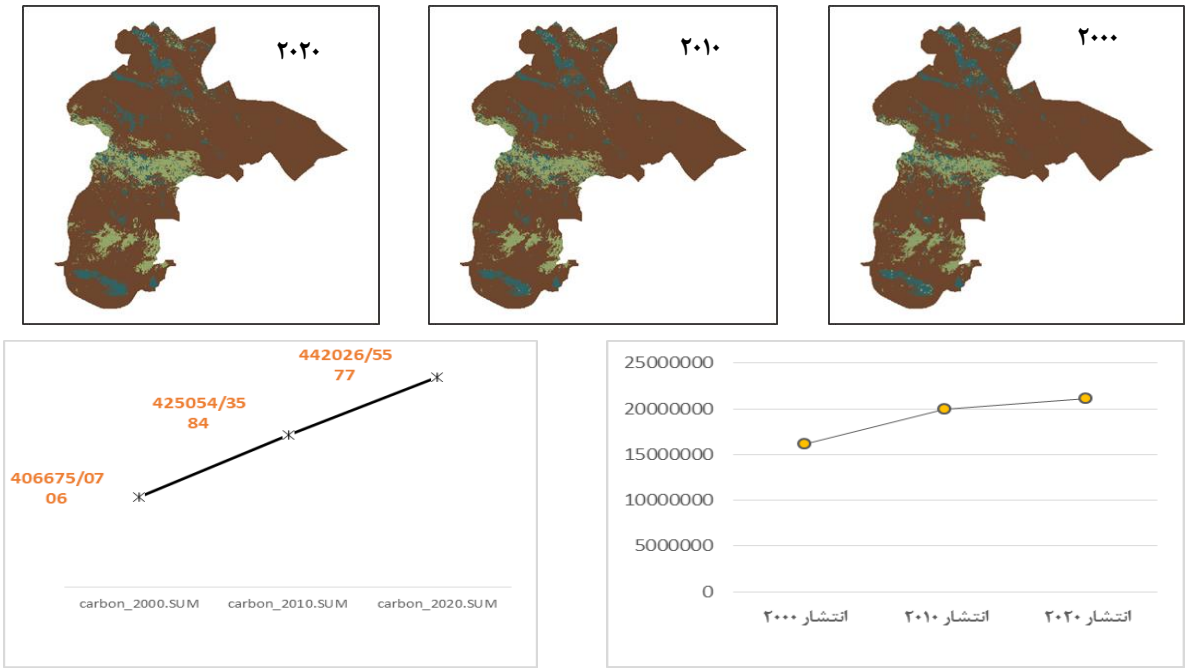
تغییرات خدمات اکوسیستمی

عرضه و تقاضای ترسیب کربن

میزان انتشار کربن طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ افزایش داشته است به‌طوری‌که از سال ۲۰۰۰ به ۲۰۱۰ به اندازه ۲۳/۳۴ افزایش داشته و در طول سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ حدود ۵/۶ درصد افزایش داشته است. این درحالی است که میزان رشد ذخیره کربن از سال ۲۰۰۰ به ۲۰۱۰ به اندازه ۴/۵ درصد و در دوره دوم ۳/۹ درصد بوده است. از نظر توزیع فضایی، بیشترین میزان ذخیره کربن مربوط به شمال غرب و جنوب منطقه است که غالباً دارای کاربری مرتع و اراضی زراعی هستند و در مناطق میانی میزان انتشار کمتر شده است. این مناطق بوته‌زار و پوشش گیاهی بسیار تنک هستند (شکل ۹).

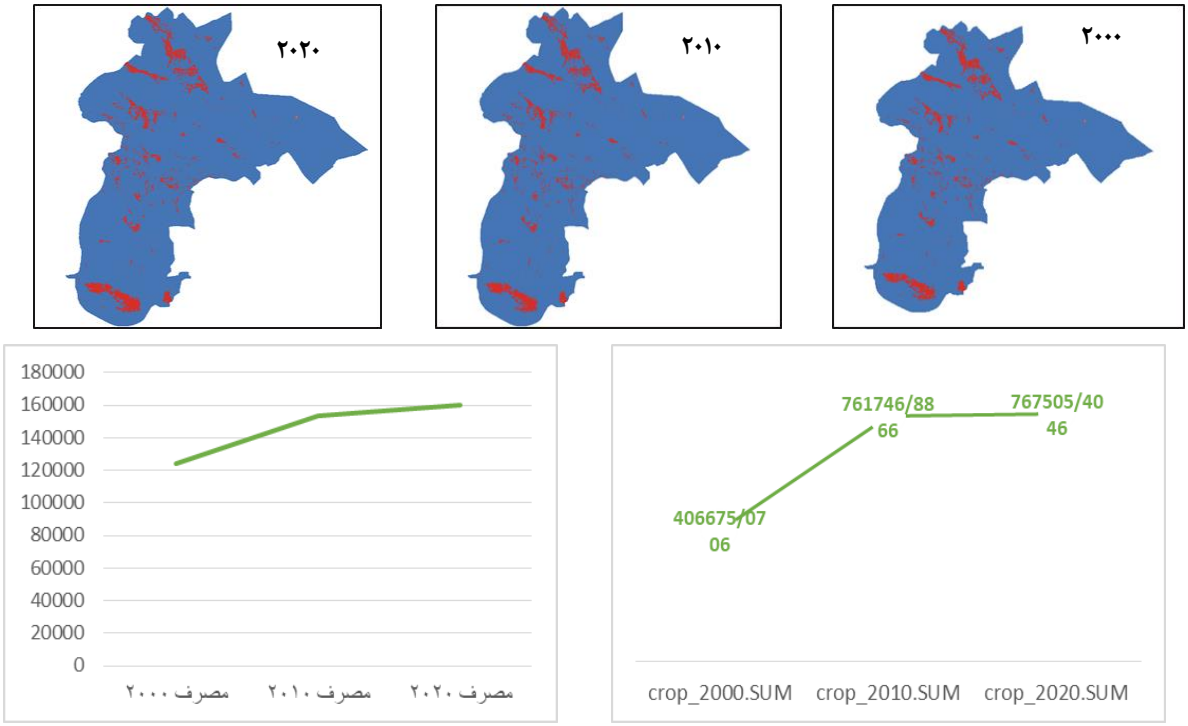
تغییرات عرضه و تقاضای غذا

میزان مصرف/تقاضای تولیدات کشاورزی در منطقه طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ افزایش داشته به‌طوری‌که این میزان افزایش رشد از سال ۲۰۰۰ به ۲۰۱۰ به اندازه ۲۳/۳۹ درصد بوده و در طول سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ این مقدار با رشد کمتر و حدود ۴/۶ درصد بوده است. این درحالی لست که تولید غذا، میزان رشد تولید غذا از سال ۲۰۰۰ به ۲۰۱۰ به اندازه ۳/۸۷ درصد و در دوره دوم ۰/۷۵ درصد بوده است و بیشترین میزان تولید غذا مربوط به شمال غرب و جنوب منطقه است که غالباً دارای کاربری اراضی زراعی هستند (شکل ۱۰).



شکل ۹- تغییرات عرضه و تقاضای ترسیب کربن طی سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۱۰

Fig. 9- Supply and demand changes of carbon sequestration in 2010-2020



شکل ۱۰- تغییرات عرضه و تقاضای تولید غذا طی سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۱۰

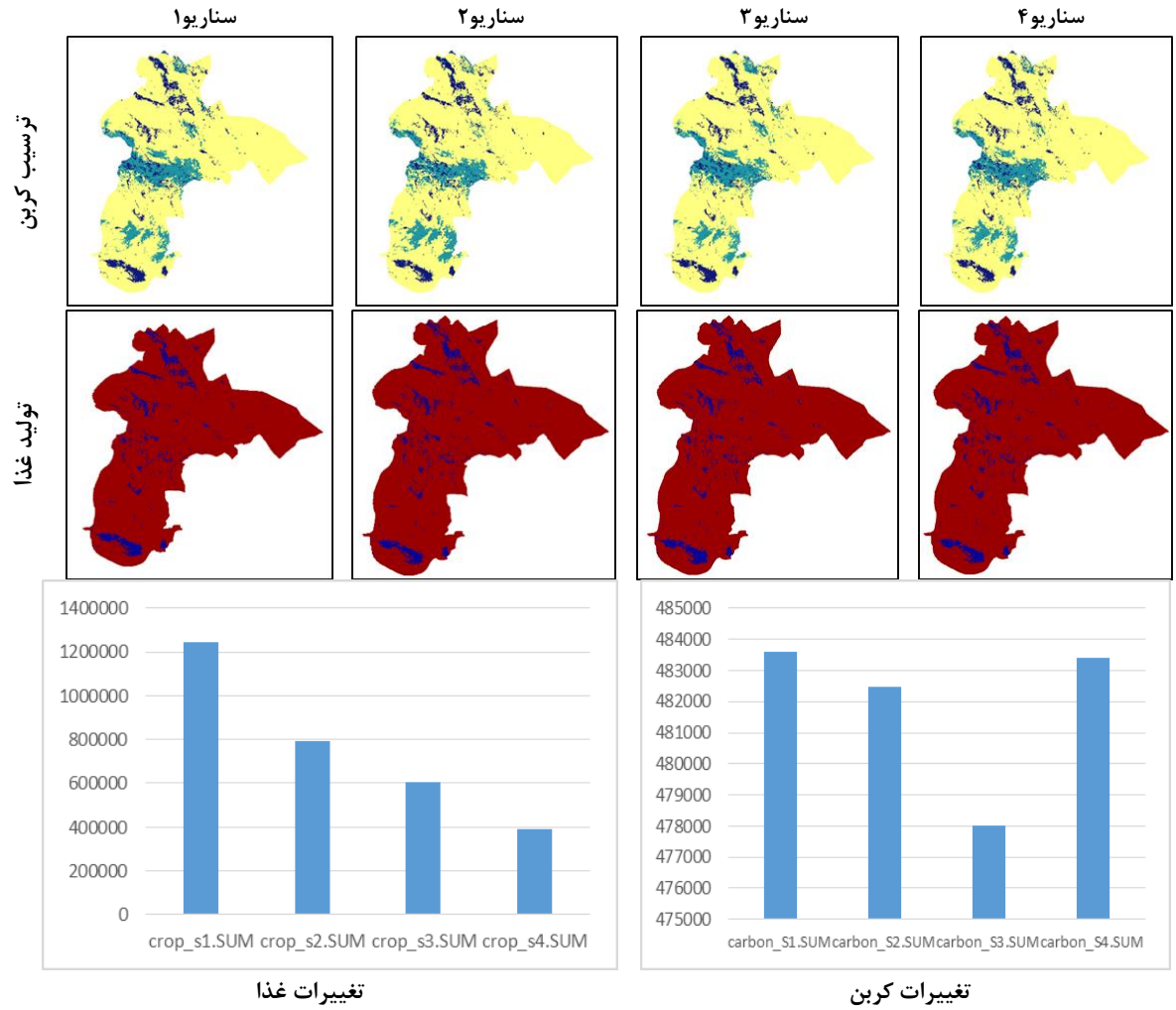
Fig. 10- Food supply and demand changes in 2010-2020

تغییرات خدمات اکوسیستم تحت سناریوهای تغییرات اقلیم

با مقایسه دو خدمت اکوسیستمی ترسیب کربن و تولید غذا تحت چهار سناریو تغییرات اقلیمی، تولید غذا در سناریوی اول در بیشترین مقدار و معادل ۱۲۴۳۹۶۵/۰۶۷ تن بوده که روند نزولی در سناریو دوم تا چهارم را نشان می‌دهد. تولید غذا در سناریو دوم ۷۹۰۶۴۹.۲۸۵۷ تن، در سناریو سوم ۶۰۴۱۷۴.۳۱۹۲ تن و در سناریو بدبینانه ۳۹۲۷۷۱.۱۹۳۶ تن ارزیابی‌شده است(شکل ۱۱). به‌طور طبیعی عرضه و تقاضای خدمات اکوسیستمی به‌ویژه غذا طی تغییرات کاربری مخصوصاً در اراضی تحت ساخت‌وساز انسان، شدیداً تغییر می‌کند، اما این مهم با توجه به مشکلات آب طی تغییرات اقلیمی در برنامه‌ریزی‌های فضایی آتی اهمیت دوچندان پیدا خواهد نمود (Kashef *et al.*, 2023). لذا آمایش سازگار با تغییرات کمی و کیفی در خدماتی اکوسیستم طی زمان مخصوصاً در خصوص عرضه و تقاضای غذا ضروری است (Jalota *et al.*, 2018).

همسو با تولید غذا، ترسیب کربن نیز تغییرات نسبتاً مشابهی دارد با این تفاوت که در سه سناریو اول، دوم و چهارم، تفاوت‌ها چندان محسوس نبوده و مقادیر به ترتیب در سناریو اول ۴۸۳۵۹۶.۲۷ تن، در سناریو دوم ۴۸۲۴۷۴.۴۶۲۵ تن و سناریو چهارم ۴۸۳۴۲۱.۶۸۴۴ تن ارزیابی‌شده‌اند. اما در سناریو سوم میزان ذخیره کربن کاهش محسوسی داشته و به مقدار ۴۷۸۰۱۲.۴۱۰۸ تن رسیده است. تغییرات میزان ترسیب کربن به شکل مستقیم نیز دارای سینرژی بوده که موجب کاهش در سایر خدمات اکوسیستمی می‌شود که طی تغییرات اقلیمی شدت بیشتری خواهد داشت (Wang *et al.*, 2022b). به همین دلیل عرضه و تقاضای کربن به عنوان یکی از فاکتورهای مهم باید برای تدوین برنامه‌های توسعه فضایی پایدار و سازگار با اقلیم مدنظر قرار گیرد (Friedlingstein *et al.*, 2022). مشابه با این نتایج Zhang *et al.*, 2022 نیز نشان دادند که تغییرات کاربری اراضی خدمات اکوسیستمی در افق ۲۰۳۵ در حوزه Xijiang چین تحت سناریوی

RCP.4.5 کمترین تغییرات را خواهد داشت و با تغییر شدیدتر فاکتورهای اقلیمی، خدمات تولید اکوسیستم نیز کاهش شدیدی را نشان خواهند داد. همچنین با بررسی اثرات تغییرات اقلیمی در جنوب شرق ایران، Molazehi *et al.*, 2024 نشان دادند که تولید و تقاضای محصولات کشاورزی با سناریوهای تغییر تطابق ندارد و برنامه‌ریزی سازگار برای آینده ضروری است. Scott *et al.*, 2019 نیز، تولید اکوسیستم در هند را همسو با سناریوهای تغییر اقلیمی مورد بررسی قرار دادند و ناسازگاری تغییرت کاربری و کاهش تولید را برای سال ۲۰۳۰ گزارش نمودند.



شکل ۱۱- تغییرات خدمات اکوسیستمی عرضه و تقاضای تولید غذا و کربن تحت سناریوهای تغییر اقلیم

Fig. 11- Ecosysstem services food and carbon supply and demand changes under climate change scenarios

نتیجه‌گیری

سازگاری یکی از ویژگی‌های اساسی یک برنامه آمایشی بوده و برای سناریوهای مختلف تغییرات محیطی، باید برنامه‌های متناسب با آن را داشته باشد و از انعطاف‌پذیری لازم برخوردار باشد؛ به‌نحوی‌که تعادل فضایی به‌عنوان مهم‌ترین هدف آمایش سرزمین تحت شرایط متنوع و متغیر محیطی محقق شود. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از مدل‌ها و الگوریتم‌های یادگیری ماشین و شبیه‌سازی اثرات عوامل محیطی بر تغییرات پوشش اراضی این امکان را فراهم می‌آورد که برنامه‌های آمایشی تدوین‌شده را بر این اساس مورد ارزیابی قرارداد و چارچوبی را ارائه می‌دهد که بر اساس آن می‌توان سازگاری برنامه‌ها را در بخش‌های مختلف

موردسنجش قرارداد. شبیه‌سازی اثرات تغییرات اقلیمی (بارش و دما) در هر چهار سناریوی تغییرات اقلیمی، حاکی از این است که تغییرات پوشش اراضی و به‌تبع آن تغییر میزان عرضه و تقاضای خدمات اکوسیستمی منجر به تغییر ساختار فضایی منطقه نیز خواهد شد. لذا سازگاری با تغییرات محیطی در جهت دستیابی به تعادل فضایی از طریق پیش‌بینی دقیق اثرات عوامل بیرونی بر ساختار فضایی یک منطقه و به‌تبع آن پیش‌بینی راهکارهای مدیریتی در یک برنامه آمایشی با در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی امکان‌پذیر خواهد بود.

از طرفی توجه به تغییرات زیست‌محیطی و خدمات اکوسیستمی تحت تغییرات اقلیمی می‌تواند در راستای نیل به اهداف توسعه پایدار در این مناطق موردتوجه قرار بگیرد. لذا پیشنهاد می‌شود که از یافته‌های پژوهش حاضر و سایر موارد مشابه برای پیش‌بینی اثرات احتمالی تغییرات کلان محیطی بر روی نتایج و دستاوردهای برنامه‌های بلندمدت توسعه فضایی استفاده‌شده و چارچوب دقیقی برای ارزیابی این نوع برنامه‌ها از جهات گوناگون به کار گرفته شود. همچنین پیشنهاد می‌شود که تحقیقات آتی تمرکز بیشتری بر روی روش‌های دقیق پیش‌بینی تغییرات پوشش اراضی با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی داشته و سناریوهای مختلف اثرات عوامل بیرونی اعم از محیطی و غیر محیطی را در مدل‌های طراحی‌شده پیش‌بینی نمایند. با توجه به غیرقابل‌پیش‌بینی بودن تغییرات اقلیمی، برنامه‌های آمایشی به‌گونه‌ای باید طراحی شوند که در برابر تغییرات کلان محیطی و اقلیمی انعطاف‌پذیر باشند. از طرفی با توجه به اثرات محسوس تغییرات اقلیمی بر خدمات اکوسیستمی و کاربری آتی زمین، اتخاذ روش‌هایی برای افزایش ظرفیت‌های ذخیره آب و مدیریت و استفاده اصولی منابع زیست طبیعی ضروری خواهد بود. در همین راستا برای نیل به نتایج دقیق‌تر، استفاده از روش‌های مدل‌سازی پیشرفته‌تر، استفاده از داده‌های دقیق‌تر اقلیمی و بررسی تأثیرات بلندمدت تغییرات کاربری بر منابع اکوسیستمی پیشنهاد می‌گردد.

سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از رساله دکتری با عنوان " تدوین چارچوب ارزیابی نتیجه‌گرا در آمایش سرزمین با تاکید بر ظرفیت برد-(مطالعه موردی:استان کرمان)" می‌باشد. نویسندگان مراتب سپاس خود را از دانشگاه شهید بهشتی و پژوهشکده علوم محیطی بابت حمایت‌های علمی، فراهم‌سازی زیرساخت‌های پژوهشی، و همراهی ارزشمند در مراحل مختلف تدوین این پژوهش ابراز می‌دارند.

پی‌نوشت‌ها

[1] Adaptive Approach
[2] Machine-learning
[3] Land use/land cover (LULC)
[4] Random Forest Regression
[5] Driving Force
[6] Contribution

منابع

Chegnizadeh, A., Rabieifar, H., Ebrahimi, H. and Zakeri, N.M. (2023). The effect of mid-term changes in climate and land use on flow reduction in Karkheh Catchment. Journal of Soil and Water Resources Conservation. 2 (46):13-29. https://sid.ir/paper/1064739/en.

Davis, D.E. and Keating, A.M. (2015). Development and Urbanization. International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences (Second Edition). J. D. Wright. Oxford, Elsevier: 282-289. doi.org/10.1016/B978-0-08-097086-8.10102-3

Doelman, J. C., Stehfest, E., Tabeau, A., van Meijl,

References

Amado, A., & Cavaco, C. S. (n.d.). Benefits of evaluation in spatial planning: Learnings from three methodologies. International Journal for Housing Science & Its Applications, 39(1). https://housingscience.org/volume-39-issue-1

Bey, A., Jetimane, J., Lisboa, S. N., Ribeiro, N., Sitoe, A., & Meyfroidt, P. (2020). Mapping smallholder and large-scale cropland dynamics with a flexible classification system and pixel-based composites in an emerging frontier of Mozambique. Remote Sensing of Environment, 239, 111611. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111611

H., & Lassaletta, L. (2018). Exploring SSP land-use dynamics using the IMAGE model: Regional and gridded scenarios of land-use change and land-based climate change mitigation. Global Environmental Change, 48, 119–135. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.11.014

Douvere, F., & Ehler, C. N. (2011). The importance of monitoring and evaluation in adaptive maritime spatial planning. Journal of Coastal Conservation, 15(2), 305–311. https://doi.org/10.1007/s11852-010-0100-9

Ebrahimi, E., Ranjbaran, Y., Sayahnia, R., & Ahmadzadeh, F. (2022). Assessing the climate change effects on the distribution pattern of the Azerbaijan Mountain Newt (Neurergus crocatus). Ecological Complexity, 50, 100997. https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2022.100997

Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Le Quéré, C., & Peters, G. P. (2022). Global Carbon Budget 2021. Earth System Science Data, 14(4), 1917–2005. https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022

Gebalska, B. A. (2017). Using global trends as catalysts for city transition. Procedia Engineering, 198, 600–611. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.114

Ghiami-Shomami, F., Sabziparvar, A. A., & Shinoda, S. (2018). Long-term comparison of the climate extremes variability in different climate types located in coastal and inland regions of Iran. Theoretical and Applied Climatology, 136, 875–897. https://doi.org/10.1007/s00704-018-2523-4

Hersperger, A. M., Oliveira, E., Pagliarin, S., Palka, G., Verburg, P., Bolliger, J., & Grădinaru, S. (2018). Urban land-use change: The role of strategic spatial planning. Global Environmental Change, 51, 32–42. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.05.001

Howes, E., Birchenough, S., & Lincoln, S. (2018). Effects of climate change relevant to the Pacific Islands. Pacific Marine Climate Change Report Card Science Review, 1, 1–19. https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/1_Climate_change_overview.pdf

IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (R. K. Pachauri & L. A. Meyer, Eds.). IPCC. https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/

Jalota, S. K., Vashisht, B. B., Sharma, S., & Kaur, S. (2018). Chapter 5 - Adaptation and mitigation. In Understanding Climate Change Impacts on Crop Productivity and Water Balance (pp. 78–148). Academic Press. https://doi.org/10.1016/C2015-0-05656-8.

Kashef, M., Mobarghei Dinan, N., & Esmaeilzadeh, H. (2023). Assessment of supply and demand multiple ecosystem services, using comprehensive framework in region 4 of Iran spatial plan. Journal of Natural Environment, 75(Special Issue Coastal and Marine Environment), 257–274. https://doi.org/10.22059/jne.2023.353709.2513

Mansouri Daneshvar, M. R., Ebrahimi, M., & Nejadsoleymani, H. (2019). An overview of climate change in Iran: Facts and statistics. Environmental Systems Research, 8(1), 1–10. https://doi.org/10.1186/s40068-019-0135-3

Meyfroidt, P., Roy Chowdhury, R., & de Bremond, A. (2018). Middle-range theories of land system change. Global Environmental Change, 53, 52–67. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.08.006

Msofe, N., Sheng, L., & Lyimo, J. (2019). Land use change trends and their driving forces in the Kilombero Valley Floodplain, Southeastern Tanzania. Sustainability, 11, 505. https://doi.org/10.3390/su11020505

Nadin, V., Stead, D., Dąbrowski, M., & Fernandez-Maldonado, A. M. (2021). Integrated, adaptive and participatory spatial planning: Trends across Europe. Regional Studies, 55(5), 791–803. https://doi.org/10.1080/00343404.2020.1817363

Nazaripour, H., Mollazehi, A., & Khosravi, M. (2024). Adaptation strategies of farmers to climate change and its impact on date palm production in southeastern Iran. Iranian Water Researches Journal, 18(1), 49–61. https://doi.org/10.22034/iwrj.2024.14567.2564

Ngoy, K. I., Qi, F., & Shebitz, D. J. (2021). Analyzing and predicting land use and land cover changes in New Jersey using multi-layer perceptron–Markov chain model. Earth, 2(4), 845–870. https://doi.org/10.3390/earth2040050

Oliveira, E., & Meyfroidt, P. (2022). Strategic spatial planning in emerging land-use frontiers: Evidence from Mozambique. Ecology and Society, 27(2), 1–24. https://doi.org/10.5751/ES-13001-270205

Sarkodie, S. A., & Strezov, V. (2019). Economic, social and governance adaptation readiness for mitigation of climate change vulnerability: Evidence from 192 countries. Science of The Total Environment, 656, 150–164. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.349

Schulte, H., Tobias, J. A., Durant, S. M., & Pettorelli, N. (2021). Improving predictions of climate change–land use change interactions. Trends in Ecology & Evolution, 36(1), 29–38. https://doi.org/10.1016/j.tree.2020.08.019

Scott, G. J., Petsakos, A., & Juarez, H. (2019). Climate change, food security, and future scenarios for potato production in India to 2030. Food

Security, 11, 43–56. https://doi.org/10.1007/s12571-019-00897-z

Sharifi, O., Afzali Gorouh, A., & Babaee, M. (2019). Identify the challenges of sustainable agricultural development in the south of Kerman Province. Geography and Environmental Sustainability, 9(1), 91–106. https://doi.org/10.22126/ges.2019.1065

Sharp, R., Chaplin-Kramer, R., Wood, S., Guerry, A., Tallis, H., & Ricketts, T. H. (2014). InVEST user's guide: Integrated valuation of environmental services and tradeoffs. The Natural Capital Project. https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest

Shen, H., Teng, F., & Song, J. (2018). Evaluation of spatial balance of China's regional development. Sustainability, 10, 3314. https://doi.org/10.3390/su10093314

Surya, B., Ahmad, D. N. A., Sakti, H. H., & Sahban, H. (2020). Land use change, spatial interaction, and sustainable development in the metropolitan urban areas, South Sulawesi Province, Indonesia. Land, 9(3), 95. https://doi.org/10.3390/land9030095

Wang, J., Bretz, M., Dewan, M. A. A., & Delavar, M. A. (2022a). Machine learning in modelling land-use and land cover-change (LULCC): Current status, challenges and prospects. Science of The Total Environment, 822, 153559. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153559

Wang, S. H., Huang, S. L., & Huang, P. J. (2018). Can spatial planning really mitigate carbon dioxide emissions in urban areas? A case study in Taipei, Taiwan. Landscape and Urban Planning, 169, 22–36. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.08.001

Wang, Z., Li, X., Mao, Y., Li, L., Wang, X., & Lin, Q. (2022b). Dynamic simulation of land use change and assessment of carbon storage based on climate change scenarios at the city level: A case study of Bortala, China. Ecological Indicators, 134, 108499. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.08.001

Zhang, F., Kung, H. T., & Johnson, V. C. (2017). Assessment of land-cover/land-use change and landscape patterns in the two national nature reserves of Ebinur Lake Watershed, Xinjiang, China. Sustainability, 9(5), 724. https://doi.org/10.3390/su9050724

Zhang, Y., Wu, T., Song, C., Hein, L., Shi, F., Han, M., & Ouyang, Z. (2022). Influences of climate change and land use change on the interactions of ecosystem services in China's Xijiang River Basin. Ecosystem Services, 58, 101489. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101489

This page is intentionally left blank.